

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Н. В. Лапицкая¹, Е. Ю. Тихонова², А. Н. Мацкевич²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Минск, Беларусь

E-mail: lapan@mail.ru, arturma@mail.ru

Рассмотрена методика оценки надежности узлов радиоэлектронных средств с учетом влияния внешних тепловых и механических воздействий, представлены результаты моделирования механических и тепловых процессов в печатной плате образца радиоэлектронного средства.

Ключевые слова: радиоэлектронное средство, гармоническая вибрация, случайная вибрация, линейное ускорение, акустический шум, ударное воздействие, тепловое воздействие, показатели надежности.

При разработке радиоэлектронных средств (РЭС) большое внимание уделяется надежно-ориентированному проектированию, когда почти в каждой проектной работе рассматривается влияние ее результатов на показатели надежности. Требования по надежности разрабатываемых РЭС, задаваемые в технических заданиях, должны быть подтверждены к концу разработки, перед началом серийного производства и эксплуатации. При этом важная роль отводится математическому моделированию протекающих в изделии физических процессов (электрических, тепловых, аэродинамических, механических и др.), определяющих во многом их надежность [1].

В процессе эксплуатации механические воздействия вызывают от 30 до 50% отказов РЭС, подавляющее большинство которых связано с выходом за пределы, установленные нормативно-технической документацией, механических характеристик конструкций РЭС – ускорений, перемещений, напряжений, что приводит к нарушению прочности и устойчивости работы аппаратуры. Кроме того, при эксплуатации на аппаратуру могут одновременно действовать несколько видов механических воздействий, например, вибрации, удары и акустический шум; линейное ускорение и акустический шум и т.д. Поэтому при оценке надежности проектируемых РЭС необходимо рассматривать «сложное механическое воздействие», что означает одновременное приложение к аппаратуре двух и более видов механических воздействий.

Наличие тепловыделяющих элементов в составе конструкций РЭС в сочетании с широким диапазоном температур окружающей среды приводит к появлению паразитного теплового фактора, оказывающего существенное влияние на механические процессы, в том числе за счет появления температурных напряжений. При этом от температуры зависят такие физико-механические параметры, как модуль упругости, коэффициент механических потерь, предел усталости. Таким образом, необходим комплексный учет воздействия механических факторов и температуры для принятия адекватных мер по обеспечению

требуемых механических характеристик и надежности. Количественно надежность характеризуется показателями надежности, отражающими те или иные ее свойства. Основными показателями безотказности являются:

- вероятность безотказной работы $R(t)$,
- интенсивность отказов $\lambda(t)$,
- средняя наработка до отказа T_1 .

Рассмотрим методику расчета показателей безотказности РЭС с учетом реальных режимов и условий эксплуатации.

1. Вычисление показателей безотказности электрорадиоизделий (ЭРИ).

Вероятность безотказной работы при экспоненциальном законе распределении наработки до отказа имеет вид

$$R(t) = e^{(-\lambda t)},$$

а средняя наработка до отказа

$$T_1 = \frac{1}{\lambda}.$$

Значения эксплуатационной интенсивности отказов большинства групп ЭРИ рассчитываются по математическим моделям, имеющим вид

$$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{б}} \prod_{i=1}^n K_i \quad \text{или} \quad \lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{б.с.г.}} \prod_{i=1}^n K_i,$$

где $\lambda_{\text{б}}(\lambda_{\text{б.с.г.}})$ – исходная (базовая) интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ, рассчитанная по результатам испытаний ЭРИ на безотказность, долговечность, ресурс;

K_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов (режимов и условий эксплуатации, а также конструктивных, функциональных и технологических особенностей ЭРИ);

n – число учитываемых факторов.

Для отдельных групп сложных изделий, суммарный поток отказов которых складывается из независимых потоков отказов составных частей ЭРИ, математическая модель расчета интенсивности отказов имеет вид

$$\lambda_{\text{Э}} = \sum_{j=1}^m \lambda_{\text{б}j} \times \prod_{i=1}^{n_j} K_{ij},$$

где $\lambda_{\text{б}j}$ – исходная (базовая) интенсивность j -го потока отказов, m – количество независимых потоков отказов составных частей ЭРИ, K_{ij} – коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора в j -м потоке отказов, n_j – количество факторов, учитываемых в j -м потоке отказов.

Коэффициенты K_i j -го потока отказов, входящие в математические модели прогнозирования интенсивности отказов ЭРИ, условно можно разделить на две группы (табл. 1):

первая группа коэффициентов является общей для моделей большинства классов, групп и типов изделий и характеризует режимы и условия их эксплуатации, уровень качества производства ЭРИ;

вторая группа коэффициентов включается в модели конкретных классов (групп) ЭРИ и характеризует зависимость интенсивности их отказов в заданных условиях эксплуатации от конструктивных, функциональных и технологических особенностей ЭРИ.

Таблица 1

Характеристика коэффициентов моделей расчета интенсивности отказов ЭРИ

Условные обозначения и названия коэффициентов моделей	Факторы, учитываемые коэффициентами
Общие коэффициенты моделей	
$K_p (K_t)$ – коэффициент режима	Величина электрической нагрузки и (или) температура окружающей среды (корпуса изделия)
$K_{пр}$ – коэффициент приемки	Степень жесткости требований к контролю качества и правила приемки изделий
$K_{э}$ – коэффициент эксплуатации	Степень жесткости условий эксплуатации
$K_{ии}$ – коэффициент влияния ионизирующих излучений	Степень жесткости внешних ионизирующих излучений
Коэффициенты моделей конкретных классов ЭРИ	
<i>Интегральные микросхемы</i>	
$K_{с.т.}$	Сложность интегральной схемы и температура окружающей среды
K_V	Величина напряжения питания для КМОП микросхем
$K_{корп}$	Тип корпуса интегральной схемы
<i>Полупроводниковые приборы</i>	
$K_{ф}$	Функциональное назначение прибора (для силовых – специфика работы)
$K_{д.н.}$	Максимально допустимая (установленная в ТУ) нагрузка по мощности рассеяния (току)
K_S	Отношение рабочего напряжения к максимально допустимому напряжению по ТУ

При расчете надежности аппаратуры, которая в эксплуатации основную часть времени находится в режиме ожидания (хранения) в обесточенном состоянии с периодическим контролем работоспособности, рекомендуется использовать значения интенсивности отказов $\lambda_{э.х.}$ групп ЭРИ, рассчитываемые по моделям:

для неподвижных объектов:

$$\lambda_{э.х.} = \lambda_{х.с.г} K_{t.х} K_{усл} K_{пр},$$

для подвижных объектов:

$$\lambda_{э.х.} = \lambda_{х.с.г} K_{t.х} K_{э} K_{пр},$$

где $\lambda_{х.с.г}$ – интенсивность отказов ЭРИ по результатам испытаний изделий на сохранение в упаковках заводов-изготовителей;

$K_{t.х}$ – коэффициент, учитывающий изменение интенсивности отказов $\lambda_{х.с.г}$ в зависимости от температуры окружающей среды;

$K_{пр}$ – коэффициент приемки;

$K_{э}$ – коэффициент эксплуатации;

$K_{усл}$ – коэффициент, учитывающий изменение интенсивности отказов $\lambda_{х.с.г}$ в зависимости от условий эксплуатации в режиме ожидания (хранения).

2. Вычисление показателей безотказности нерезервированных систем РЭС.

Вероятность безотказной работы $R_C(t)$ в течение времени t системы, имеющей последовательное соединение n элементов в смысле надежности (система остается работоспособной, если все элементы исправны) с независимыми и случайными отказами этих элементов, определяется как

$$R_C(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{(-\lambda_i t)} = e^{(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t)} = e^{(-\lambda_C t)},$$

где $R_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента,

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i - \text{интенсивность отказов системы.}$$

3. Вычисление показателей безотказности резервированных систем РЭС.

Определим основные показатели безотказности резервированной системы с позиции возможных режимов нагрузки, которые могут иметь место при эксплуатации системы.

3.1. Безотказность системы при пассивном резервировании с неизменной нагрузкой и при активном нагруженном резервировании.

В обоих случаях основные показатели надежности указанных систем оцениваются одними и теми же математическими выражениями. Будем полагать что переключатель, включающий резерв, обладает мгновенным быстродействием и абсолютной надежностью. Тогда вероятность безотказной работы

$$R_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_i(t)) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - e^{(-\lambda_i t)}),$$

где $R_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го устройства, m – число соединенных параллельно устройств (основное и резервные), λ_i – интенсивность отказов i -го устройства.

3.2. Безотказность системы (РЭС) при активном облегченном резервировании.

При идеальном переключателе резерва вероятность безотказной работы определяется из выражения

$$R_C(t) = e^{(-\lambda_0 t)} + e^{(-\lambda_0 t)} \sum_{j=1}^{m-1} \frac{(1 - e^{(-\lambda_j t)})^j}{j!} \prod_{i=1}^j \left(i - 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_i} \right), \quad (\forall i \in [1, m-1]) \quad (\lambda_0 > \lambda_i),$$

где λ_0 и λ_i – соответственно интенсивности отказов работающего основного устройства и i -го устройства, находящегося в облегченном резерве.

3.3. Безотказность системы при активном ненагруженном резервировании.

При идеальном переключателе резерва вероятность безотказной работы определяется из выражения

$$R_C(t) = e^{(-\lambda_0 t)} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{(\lambda_0 \cdot t)^j}{j!}.$$

3.4. Безотказность системы при скользящем резервировании.

Если система состоит из n основных и одного резервного элемента, находящегося в ненагруженном состоянии, вероятность безотказной работы

$$R_C(t) = \left\{ 1 + n \frac{\lambda_0}{\lambda_n} [1 - e^{(-\lambda_n t)}] \right\} e^{(-n\lambda_0 t)},$$

где λ_0 и λ_n – соответственно интенсивности отказов работающего элемента и переключателя резерва.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Рассмотрим пример расчета показателей надежности печатной платы образца РЭС с учетом внешних механических и тепловых воздействий. Параметры внешних воздействий представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры внешних механических и тепловых воздействий

Воздействующий фактор	Характеристика воздействующего фактора	Значение, заданное при моделировании
Синусоидальная вибрация	Амплитуда ускорения, g	2g
	Диапазон частот, Гц	1–200
Акустический шум	Диапазон частот, Гц	50–10000
	Уровень звукового давления, дБ	130
Механический удар многократного действия	Пиковое ударное ускорение, g	10g
	Длительность действия ударного ускорения, мс	6
Повышенная температура среды для общеклиматического исполнения	Рабочая, °С	+65
	Предельная, °С	+70
Пониженная температура среды для общеклиматического исполнения	Рабочая, °С	–30
	Предельная, °С	–50

Для определения коэффициентов механической и тепловой нагрузки проведено виртуальное моделирование с помощью специализированного программного обеспечения [2]. В результате моделирования механических процессов в печатном узле при воздействии многократного удара получены: график зависимости амплитуды ускорения в контрольной точке от времени (рис. 1), поле ускорений в заданный момент времени, карта механических режимов ЭРИ (табл. 3) [3].

Таблица 3

Карта механических режимов работы ЭРИ

№ п/п	Обозначение ЭРИ	Сторона	Ускорение ЭРИ			Коэффициент механической нагрузки, [отн. ед.]	Перегрузка, [g]
			Время, [мсек]	Максимальное расчетное, [g]	Максимальное допустимое по ТУ, [g]		
1	R80	2	875,100	17,537	500,000	0,035	–
2	C40	2	875,100	17,456	500,000	0,035	–
...	–
192	ХТ1	1	874,800	14,345	500,000	0,029	–

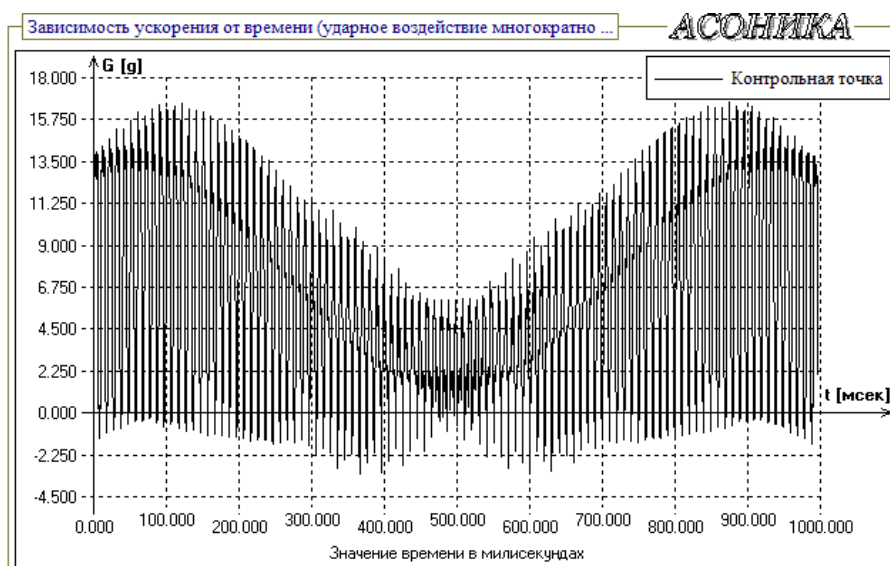


Рис. 1. Зависимость амплитуды ускорения в контрольной точке от времени при многократном ударе с пиковым ускорением 10g и 100 импульсами

В результате моделирования тепловых процессов в печатном узле получены карты тепловых режимов работы ЭРИ при повышенной рабочей температуре окружающей среды +65 °С (табл. 4) и при пониженной рабочей температуре окружающей среды –30 °С.

Таблица 4

Карта тепловых режимов работы ЭРИ при +65 °С

№ п/п	Обозначение ЭРИ	Сторона	Температура ЭРИ		Коэффициент тепловой нагрузки, отн. ед.	Перегрев, °С
			Расчетная, °С	Максимальная допустимая по ТУ, °С		
1	D5	1	84,151	85,000	0,990	—
2	D10	1	82,401	85,000	0,969	—
...
192	V29	2	68,142	150,000	0,454	—

В соответствии со списком ЭРИ и на основе базы данных с учетом реальных режимов работы электрорадиоизделий в подсистеме специализированной программы расчета показателей надежности автоматически формируется модель надежности печатного узла. При этом автоматически читается файл с температурами ЭРИ, рассчитанными ранее. В результате каждому ЭРИ присваивается значение температуры. С учетом данных, полученных при расчетах тепломеханических нагрузок и надёжных моделей РЭС, автоматически составляется характеристика надежности каждого элемента печатного узла. В результате расчета показателей безотказности в условиях эксплуатации (+25 °С) получены следующие характеристики для печатного узла: вероятность безотказной работы 0,99 (за время 1000 ч.), среднее время безотказной работы 1 162 676 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование специализированных методик и программ позволяет оценить соответствие образца РЭС предъявляемым требованиям по устойчивости к

внешним воздействующим факторам как на этапе разработки, так и при испытании серийного образца РЭС. Главным результатом является повышение эффективности проектирования высоконадежных РЭС за счет автоматизации анализа и обеспечения показателей безотказности и долговечности по результатам комплексного компьютерного моделирования физических процессов в РЭС, и как следствие сокращение сроков и стоимости разработки РЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кофанов, Ю. Н.* Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий / Ю. Н. Кофанов [и др.]. М., 2007.
2. Методика и программное обеспечение для моделирования радиоэлектронных средств на тепловые и механические воздействия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://systech.miem.edu.ru/2008/n6/shalumov.html>. Дата доступа: 03.12.2013.
3. *Мацкевич, А. Н.* Моделирование радиоэлектронных средств с использованием системы автоматического проектирования АСОНИКА: отчет о НИР / А. Н. Мацкевич [и др.]. Мн., 2012.